第 41 卷 第 3 期
2023 年 9 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 41, No. 3
Sept., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.03.07

基于混合模型的疏散星团视向速度和金属丰度研究

张书会[1,2]，刘蓉蓉[1,2]，李 璐[1]，胡国真[1,2]，邵正义[1,3]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 中国科学院大学，北京 100049； 3. 上海师范大学 上海市星系与宇宙学半解析研究重点实验室，上海 200234)

摘要： 疏散星团是研究星族和银河系形成与演化的理想示踪体。基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱，在视向速度和金属丰度两维空间上，构建包含团星和场星的混合模型：以二维正高斯模型来描述团星的分布，以星团天区周围的恒星来构建场星的分布模型。同时，在模型中考虑了观测误差的影响。对 3 个具有丰富光谱数据的典型疏散星团进行了拟合。年轻星团 Melotte 22 和中年星团 NGC 2281 可以较好地约束其视向速度的内禀弥散，分别为：$1.47^{+0.95}_{-1.18}$ km·s^{-1} 和 $2.05^{+1.39}_{-1.88}$ km·s^{-1}，而年老星团 NGC 2682 只能给出速度弥散的上限约为 0.96 km·s^{-1} 。Melotte 22、NGC 2281 和 NGC 2682 的金属丰度内禀弥散分别为：$0.170^{+0.012}_{-0.009}$ dex, (0.108 ± 0.012) dex 和 (0.050 ± 0.005) dex，都明显大于金属丰度的观测误差 (约 0.028 dex)。这说明疏散星团的成员星存在一定的化学丰度内禀弥散，这对于进一步讨论星团恒星的形成过程极为重要。

关 键 词： 疏散星团；混合模型；LAMOST；视向速度；金属丰度

中图分类号： P154.11 **文献标识码：** A

1 引 言

疏散星团不仅是恒星形成与演化的理想实验室[1–3]，也是研究银盘结构和演化的理想探针[4]，因而研究疏散星团运动学特征和化学性质极其重要。疏散星团的平均视向速度结合自行空间上的两维速度，可以反映其在银河系中的整体空间运动；星团的平均金属丰度不仅可以反映星团的整体化学性质，还可以用于研究银盘的径向和垂向金属丰度梯度及金属丰度与年龄的关系 (AMR)，以及梯度随时间的演化等银盘化学演化问题[4–12]。疏散星团内禀速

收稿日期： 2022-08-11； **修回日期：** 2022-10-13

资助项目： 国家自然科学基金 (U2031139, 12273091)；国家重点研发项目 (2019YFA0405501)；中国载人航天工程科研基金 (CMS-CSST-2021-A08)

通讯作者： 邵正义，zyshao@shao.ac.cn

度弥散可以计算星团的动力学质量[13]，以及研究疏散星团的基本面[14]；疏散星团作为一个单星族，是否存在内禀金属丰度弥散？对研究恒星形成和化学演化极其重要。

郭守敬望远镜 (the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST) 是第一台中国自主研制的 6 ~ 8 m 级大视场多光纤光谱巡天望远镜[15−20]，LAMOST 的视场约为 20 平方度，有效口径为 4 m，可以观测到暗达 20.5 mag 的天体，因此成为大口径兼大视场光学望远镜的世界之最。同时，在直径为 1.75 m 的焦面上放置了 4 000 根光纤，这样就可以同时获得 4 000 个天体的 3 700 ~ 9 000 Å 波长范围内的光谱，这是斯隆望远镜配置的光纤数目的 7 倍左右，因此 LAMOST 成为世界上光谱获取率最高的望远镜。LAMOST 低分辨率光谱大部分观测集中在银盘，因此可以覆盖大量的近邻疏散星团。

疏散星团成员星通常都与场星混淆在一起，对于处于低银纬的疏散星团，这种情况尤其严重。研究疏散星团视向速度和金属丰度的特性，特别是内禀弥散时，尽可能地减少场星污染的影响至关重要。Cantat-Gaudin 和 Anders[21] (以下简称 CG20) 基于 Gaia DR2 高精度天体测量量 (μ_α^*，μ_δ，ϖ) 运用 UPMASK 得到疏散星团的成员星及其成员概率 ($p_{\rm memb} = 0.1 \sim 1.0$)。Zhong 等人[22] (以下简称 ZC20) 利用 LAMOST DR5 低分辨率光谱和 Cantat-Gaudin 等人[23]得到的高概率成员，得到 295 个疏散星团视向速度和金属丰度均值及其表观弥散。

然而，关于星团参数弥散的测量，仍然有两个问题尚未解决：(1) 如果观测误差较大，那么星团的弥散值就可能是由观测误差主导，而不反映其真实的物理弥散；(2) 即便是考虑了高精度自行的成员，在视向速度和金属丰度空间仍然可能存在场星的污染，而造成对弥散值的高估。因此，我们将在恒星视向速度和金属丰度空间，构建包含团星和场星的混合模型，解算疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其内禀弥散，并用于 LAMOST 巡天中覆盖的若干个有较多团星观测的疏散星团。

本文第 2 章详细介绍混合模型的构建；第 3 章讲述了样本选取；第 4 章给出混合模型所得 3 个疏散星团视向速度和金属丰度均值及其内禀弥散的结果，并作比较与讨论；最后对本文工作进行总结。

2　混合模型

混合模型是由多个子成分的概率密度分布构成一个混合概率密度分布，在天文学领域已得到广泛的应用[24]。基于混合模型的工作有很多，如 Zhao 和 He[25]利用团星和场星两维自行空间的混合模型，计算了疏散星团的自行内禀弥散及成员星的成员概率；Pang 等人[14] (以下简称 PS18) 利用 APOGEE 高分辨率光谱算出的恒星视向速度和金属丰度，构建两维空间的混合模型，计算得到 26 个疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其内禀弥散；Shao 和 Li[26]基于团星和场星的混合模型得到 120 个球状星团的平均视差；Li 等人[27]基于疏散星团中单星和测光无法分辨的双星在颜色-星等图 (CMD) 上的混合模型，进而得到疏散星团 NGC 3532 中双星比例和质比分布参数。

2.1 团星模型

疏散星团一般包含几十至数千颗恒星，成员星之间靠万有引力束缚在一起。其成员星近乎同一时间诞生于同一片巨分子云中[28]，因而疏散星团是一种具有共同起源的恒星系统。通常认为，疏散星团是由相同年龄和初始化学成分、不同质量恒星构成的单星族[29]，其成员星具有相同的金属丰度和距离及空间运动。相比场星，团星在空间分布和运动学上比较聚集[30]，表现出与场星不同的性质。

在本文中，我们基于 LAMOST 低分辨率光谱的数据，分析了疏散星团的视向速度 $V_{\rm R}$ 和金属丰度 [Fe/H] 的均值及其内禀弥散。恒星的视向速度 $V_{\rm R}$ 是根据多普勒效应得到，也就是根据恒星谱线的线心位置得到恒星红移；而恒星的金属丰度 [Fe/H] 是根据恒星光谱谱线的强度获得。因而，视向速度和金属丰度是两个独立的观测参数。我们在构建混合模型时假定星团在此两维空间上是一个两维正高斯，其成员星在两维空间上的概率密度分布如下：

$$\varPhi_{\rm c}(V_{\rm R},[{\rm Fe/H}]) = \phi_{\rm c}(V_{\rm R})\,\phi_{\rm c}([{\rm Fe/H}]) \quad , \tag{1}$$

其中，$\phi_{\rm c}(V_{\rm R})$ 和 $\phi_{\rm c}([{\rm Fe/H}])$ 分别是团星在视向速度和金属丰度各自一维空间上的概率密度分布：

$$\phi_{\rm c}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\exp\left[-\frac{(x-\overline{x})^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad , \tag{2}$$

其中，$x = V_{\rm R}$ 或 [Fe/H]，$\overline{x}$ 和 σ_x 分别是其均值和表观弥散。

观测上，高斯分布的表观弥散 σ_i 由内禀弥散 σ_0 和观测误差 e_{rr_i} 组成：

$$\sigma_i^2 = \sigma_0^2 + e_{rr_i}^2 \quad . \tag{3}$$

因此，当我们利用 LAMOST 低分辨率光谱算出的恒星视向速度误差和金属丰度误差时，可以得到疏散星团视向速度和金属丰度的内禀弥散。

2.2 场星模型

除了团星，星团区域还有前景星和背景星，这些场星来自不同距离处的不同星族。团星与场星表现出不同的性质，在很多工作中建立团星和场星的混合模型时[25, 30, 31]，也将场星的分布假定为高斯分布。如，Gao 和 Chen [30]基于 SEGUE 巡天数据将团星和场星的视向速度假定为不同的高斯分布，得到 5 个疏散星团的视向速度均值。

由于场星在视向速度或金属丰度空间上通常不是理想的单高斯分布，因此我们以星团邻域场星在视向速度和金属丰度两维空间 (简称“两维空间”) 上的真实概率密度分布作为混合模型中的场星模型。为了降低随机涨落的影响，我们基于视向速度和金属丰度的观测误差进行适当的平滑，得到平滑后的归一化概率密度分布。假设疏散星团区域中的场星与邻域场星在此两维空间上具有相同的分布，以疏散星团邻域大量场星 (包括重复观测) 的归一化概率密度分布作为场星模型。

2.3 混合模型

本工作中所构建混合模型在视向速度 $V_{\rm R}$ 和金属丰度 [Fe/H] 两维空间上的归一化概率

密度分布，可表示为：

$$\Phi\left(V_{\mathrm{R}},[\mathrm{Fe/H}]\right)=f_{\mathrm{c}}\Phi_{\mathrm{c}}\left(V_{\mathrm{R}},[\mathrm{Fe/H}]\right)+\left(1-f_{\mathrm{c}}\right)\Phi_{\mathrm{f}}\left(V_{\mathrm{R}},[\mathrm{Fe/H}]\right)\quad , \tag{4}$$

其中，$\Phi_{\mathrm{c}}(V_{\mathrm{R}},[\mathrm{Fe/H}])$ 和 $\Phi_{\mathrm{f}}(V_{\mathrm{R}},[\mathrm{Fe/H}])$ 分别是团星和场星的归一化概率密度分布，f_{c} 是团星在拟合样本中所占比例。

2.4 似然函数和拟合参数

2.4.1 似然函数

在模型参数的拟合中，第 i 颗恒星的似然函数为：

$$\mathcal{L}_i=\Phi(V_{\mathrm{R}i},[\mathrm{Fe/H}]_i)\quad . \tag{5}$$

在考虑重复观测时，如果第 i 颗星有 n_i 次重复观测，其联合似然函数值 $\mathcal{L}_i$ 如下：

$$\mathcal{L}_i=\prod_{j=1}^{n_i}\mathcal{L}_{i,j}^{\frac{1}{n_i}}\quad . \tag{6}$$

式 (6) 的似然函数相当于第 i 颗星 n_i 次观测的平均值，因此，该星在拟合中的权重仍然为 1，并没有因多次观测而增加。

在用似然函数求解最佳拟合参数时，通常使用似然函数的自然对数形式。包含 N 颗恒星的拟合样本的联合似然函数为：

$$\ln\mathcal{L}=\ln\prod_{i=1}^{N}\mathcal{L}_i=\sum_{i=1}^{N}\ln\mathcal{L}_i\quad . \tag{7}$$

2.4.2 拟合参数

基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得视向速度和金属丰度两维空间上构建团星和场星的混合模型，解算混合模型，可以得到团星比例、疏散星团视向速度和金属丰度的均值及内禀弥散，即 $\theta=(f_{\mathrm{c}}, V_{\mathrm{R_c}}, \sigma_{V_{\mathrm{R}}}, [\mathrm{Fe/H}]_{\mathrm{c}}, \sigma_{[\mathrm{Fe/H}]})$。

为了得到混合模型的最佳拟合参数，我们运用可以实现马尔科夫链蒙特卡洛方法 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC[32, 33]) 的 python 包 -emcee[34]，对拟合参数进行随机采样，进而得到拟合参数 θ 的概率密度分布 (PDF)。

对于解算混合模型所得拟合参数的归一化概率密度分布 $P(\theta)$，我们将分布的峰值作为拟合参数的最佳值。对于最佳拟合参数的拟合误差，我们采用最高密度区间法 (highest density interval, HDI)[35]，取 68% HDI 的范围，分别确定 Δ^{+} 和 Δ^{-} 的位置。

需要指出的是，在拟合样本没有特殊选择效应的情况下 (如只观测到视向速度大的或者小的恒星，或者只观测到富金属星或贫金属星)，混合模型在解算疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其内禀弥散时，并不依赖于拟合样本是否完备。对于观测不完备的样本，团星比例 f_{c} 只是给定样本中的相对比例，并不能严格作为团星数量的参考。

3 样本选取

LAMOST DR7 v2 低分辨率光谱 ($R \approx 1\,800$)[36]观测所得星表包括一年先导巡天和七年正式巡天观测数据，共 10 431 197 条光谱。其中，AFGK 星表①包含通过 LAMOST Stellar Parameter Pipeline (简称 LASP)[37, 38]得到 6 179 327 条光谱的恒星大气参数 (有效温度 $T_{\rm eff}$、表面重力加速度 $\lg g$、金属丰度 [Fe/H])、[α/M] (α-enhancement) 和视向速度 $V_{\rm R}$ 及其观测误差。

值得一提的是，观测参数的精确度是衡量一个巡天项目质量的关键因素，高精度测量可以得到目标源更合理可靠的内禀性质。当观测误差与内禀弥散相当或者远大于内禀弥散时，观测参数误差的高估或低估都会明显地影响相关物理性质的内禀弥散。Zhang 等人[39] 利用 LAMOST DR7 v2 低分辨率光谱中的重复观测，基于观测误差、g 波段信噪比及恒星光谱型 (A, F, G 和 K) 三维空间得到信噪比及观测误差有效的 6 079 235 条光谱视向速度和金属丰度的误差改正因子，我们将此样本称为恒星参数样本 (SP-sample)。本文所用视向速度和金属丰度观测误差即为改正值，其典型值分别为：3.78 km·s^{-1} 和 0.028 dex[39] 。

3.1 星团拟合样本的选取

我们将恒星参数样本的光谱根据观测源的空间位置 (赤经和经纬) 进行 3″ 自交叉匹配，得到包含 4 546 803 颗星的恒星样本，其中 1 029 704 颗星有重复观测。再将上述恒星样本与 Gaia DR2 在 3″ 内进行空间位置交叉匹配，得到恒星的天体测量参数。最后，与 CG20 所得疏散星团样本成员星交叉匹配，得到 366 个疏散星团，包含 5 406 颗成员星和 8 231 条光谱。

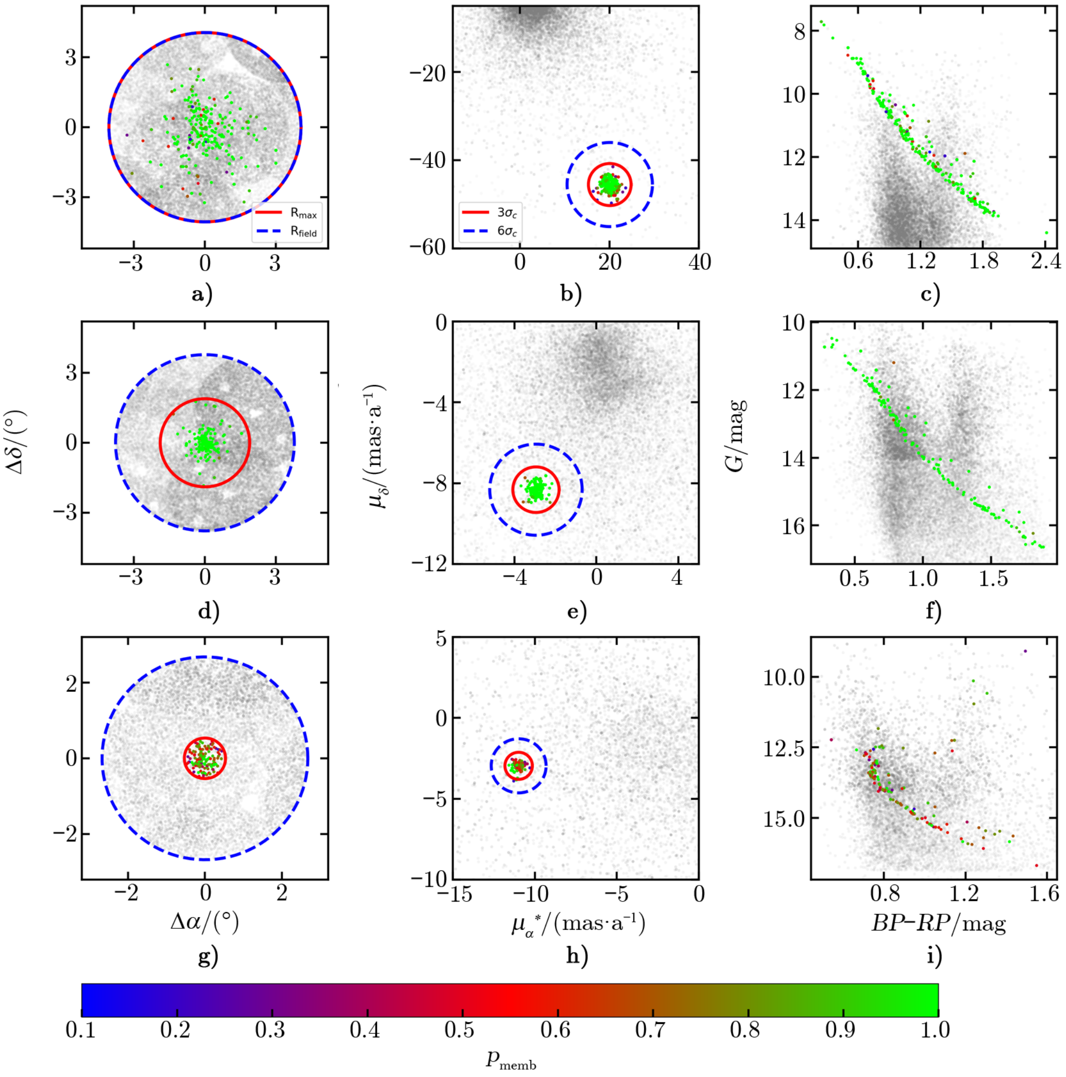
本工作中，我们结合 Cantat-Gaudin 等人[40]所给疏散星团年龄及 LAMOST DR7 观测的恒星数目，选取 Melotte 22 (年轻星团)、NGC 2281 (中年星团) 和 NGC 2682 (年老星团) 作为解算混合模型的 3 个例子。3 个疏散星团拟合样本的数目、最大半径 $R_{\rm max}$、日心距及年龄见表 1。3 个疏散星团所得拟合样本在空间位置、自行及 CMD 图中的分布如图 1 中彩色点所示。拟合样本在 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得视向速度和金属丰度两维空间上的分布如图 2 所示，可见 CG20 所得疏散星团的高概率成员星在视向速度和金属丰度空间并没有聚集在团中心区域，而是比较离散，这些高概率的离散点很可能就是混入的场星。

表 1 3 个疏散星团拟合样本及其邻域场星信息

星团	$\lg T_{\rm age}$/a	D/pc	$N_{\rm CG20}$	N_p	$R_{\rm max}/(^\circ)$	$N_{R_{\rm max}}$	$N_{\rm field}$	$N_{\rm star}$	$N_{\rm spec}$
Melotte 22	7.89	135.6	1 061	203.8	4.06	1	29 981	219	485
NGC 2281	8.79	519.4	417	139.6	1.89	2	32 817	141	258
NGC 2682	9.63	859.1	848	97.0	0.54	5	11 221	134	144

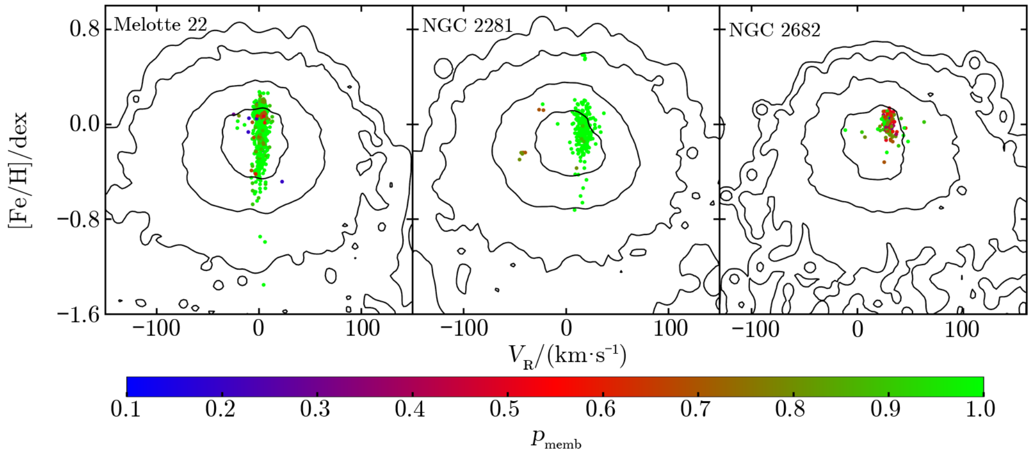
注：各列分别表示疏散星团名称、年龄[40]、疏散星团的日心距[21]、成员星个数[21]、成员星概率之和 ($N_p = \sum_{n=1}^{N_{\rm star}} p_{\rm memb}$)[21] 及成员星最大半径、场星半径倍数、场星光谱数、星团拟合样本恒星数及包括重复观测的总光谱数。

①http://dr7.lamost.org/



注：a) , b) , c) 为 Melotte 22；d) , e) , f) 为 NGC 2281；g) , h) , i) 为 NGC 2682。彩点和灰点分别是星团的拟合样本及邻域场星样本，颜色条表示 CG20 中疏散星团成员星的成员概率 $p_{\rm memb}$。a)、d) 和 g) 中红实线和蓝虚线分别是各疏散星团的最大半径 $R_{\rm max}$ 及邻域场星半径 $R_{\rm field}$；b)、e) 和 h) 中红实线和蓝虚线分别是 CG20 所得各疏散星团平均自行的 3σ 和 6σ 范围。

图 1　疏散星团 Melotte 22, NGC 2281 和 NGC 2682 的拟合样本及其邻域场星在空间位置 ($\Delta\alpha$, $\Delta\delta$)、自行 (μ_α^*, μ_δ) 及 CMD 上的分布



注：彩色散点的表示同图 1，等高线表示疏散星团邻域场星样本经过高斯平滑所得归一化数密度分布 (1 σ, 2 σ, 3 σ 和 4 σ)。

图 2　**疏散星团** Melotte 22, NGC 2281 **和** NGC 2682 **的星团拟合样本及邻域场星样本在视向速度和金属丰度两维空间上的分布**

3.2　用于构建场星模型的场星样本选取

为了得到混合模型中场星在视向速度 $V_{\rm R}$ 和金属丰度 [Fe/H] 两维空间的数密度分布，从恒星参数样本 (SP-sample) 中剔除 CG20 列出的所有疏散星团的可能成员，作为场星总样本。以疏散星团最大半径 $R_{\rm max}$ 的多倍 $N_{R_{\rm max}}$ (包含 1 万次以上光谱观测) 范围 ($R_{\rm field}$) 内的场星作为构建混合模型中场星模型的场星样本，具体信息见表 1。

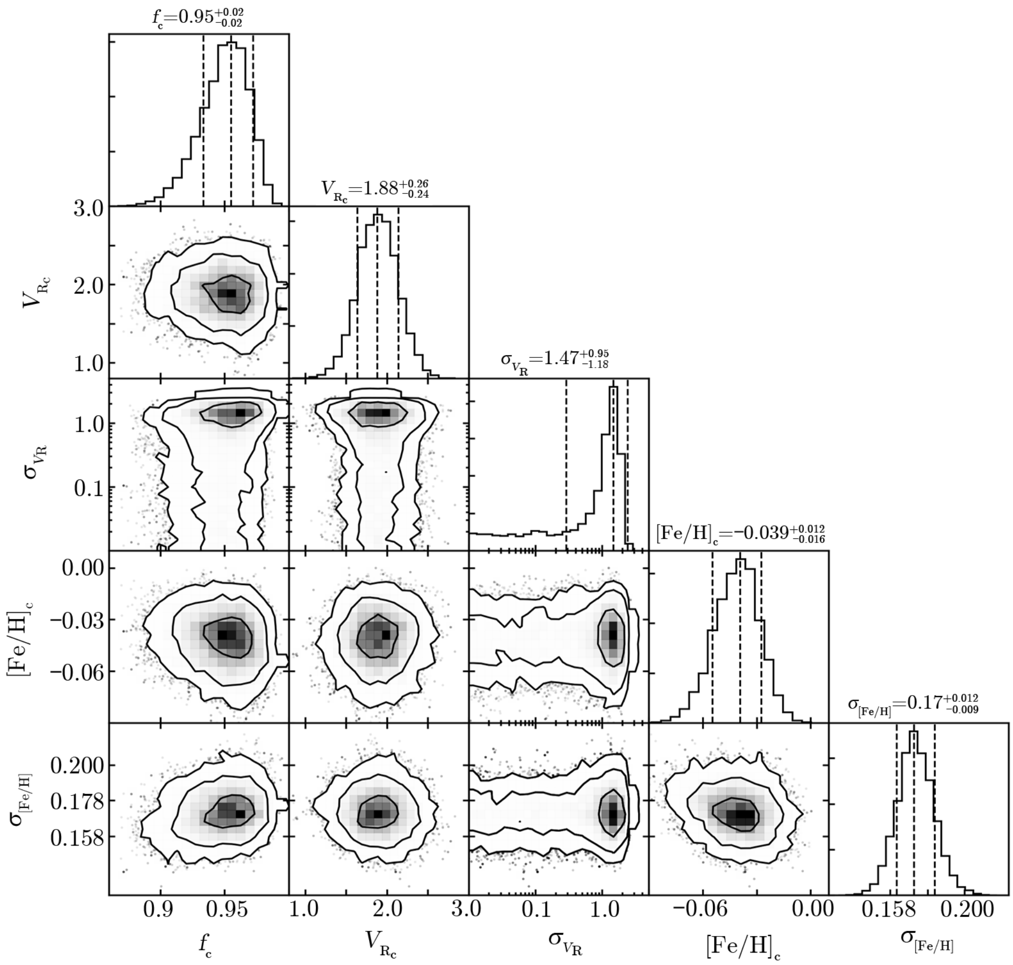
3 个疏散星团的场星在空间位置、自行及 CMD 分布如图 1 所示，经过高斯平滑 (每颗恒星各自的观测误差作为平滑尺度) 之后的场星在视向速度和金属丰度两维空间上的分布见图 2。

4　结果与讨论

4.1　结果

解算混合模型所得疏散星团 Melotte 22, NGC 2281 和 NGC 2682 拟合参数的概率密度分布分别如图 3, 4 和 5 所示，结合 HDI 方法得到 5 个拟合参数的最佳拟合值及其拟合误差，具体结果见表 2。

从图 3, 4 和 5 中可以看出，除了视向速度的内禀弥散，另外 4 个拟合参数都有良好的收敛域，说明 LAMOST 的数据以及团天区的样本恒星数已经足以限制这些参数。对于视向速度，疏散星团的内禀速度弥散通常只有$1 \sim 2$ km·s^{-1}[41]，即便我们改正过的观测误差，也有约 4 km·s^{-1}。因此，确实很难精准地锁定星团的内禀速度弥散。Melotte 22 和 NGC 2281 在参数的拟合范围内可以收敛到一个最佳拟合值，但是在低速端，PDF 仍然有明显的“拖



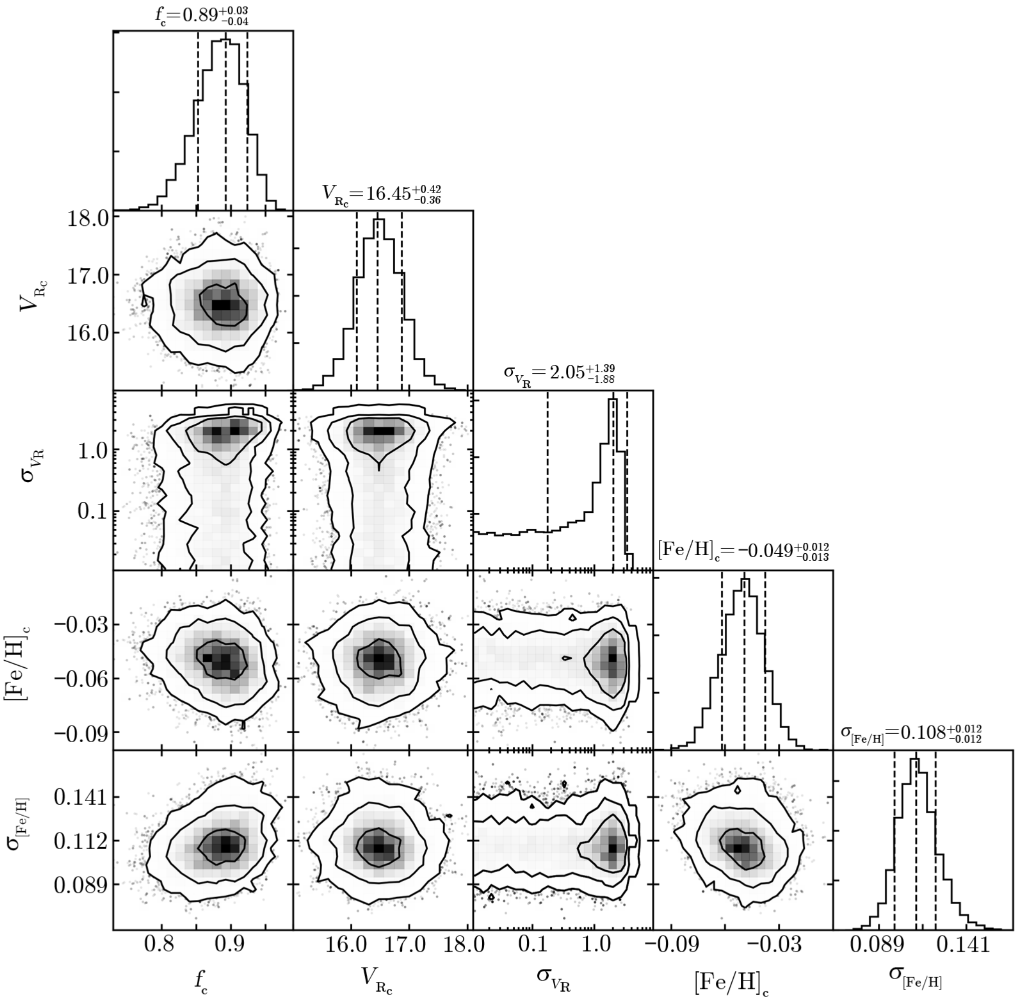
注：柱状图的三条虚线分别表示 HDI 所得 5 个参数 (f_c，V_{R_c}，σ_{V_R}，[Fe/H]$_c$，$\sigma_{[Fe/H]}$) 的最佳拟合值及取 68% HDI 时 Δ^+ 和 Δ^- 的位置。

图 3　疏散星团 Melotte 22 最佳拟合参数的概率密度分布

尾”现象。这说明从概率上说，极小的速度弥散仍然存在一定的可能性。相对较大的参数拟合误差也反映了这一点。而对于老年星团 NGC 2682，则不能直接找出速度弥散的最佳拟合值，而只能根据 PDF 的分布估算出其速度弥散的上限约为 $1\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。

在星团的金属丰度方面，3 个星团的平均值都接近于太阳丰度，是合理的拟合值。金属丰度的内禀弥散也有很好的拟合收敛，而且很明显，3 个星团的内禀弥散都显著大于金属丰度的观测误差 (约 0.03 dex)。这说明团星的金属丰度确实有一个内部的弥散分布，而不是像一般假设的那样，团星都具有相同的金属丰度。只要光谱的数量和质量足够好，这种很小的内部差异也是可以探测的。

另外，作为比较，我们也拟合了不考虑观测误差的情形。两种情况下团星数目、视向速



注：虚线和参数同 3 一致。

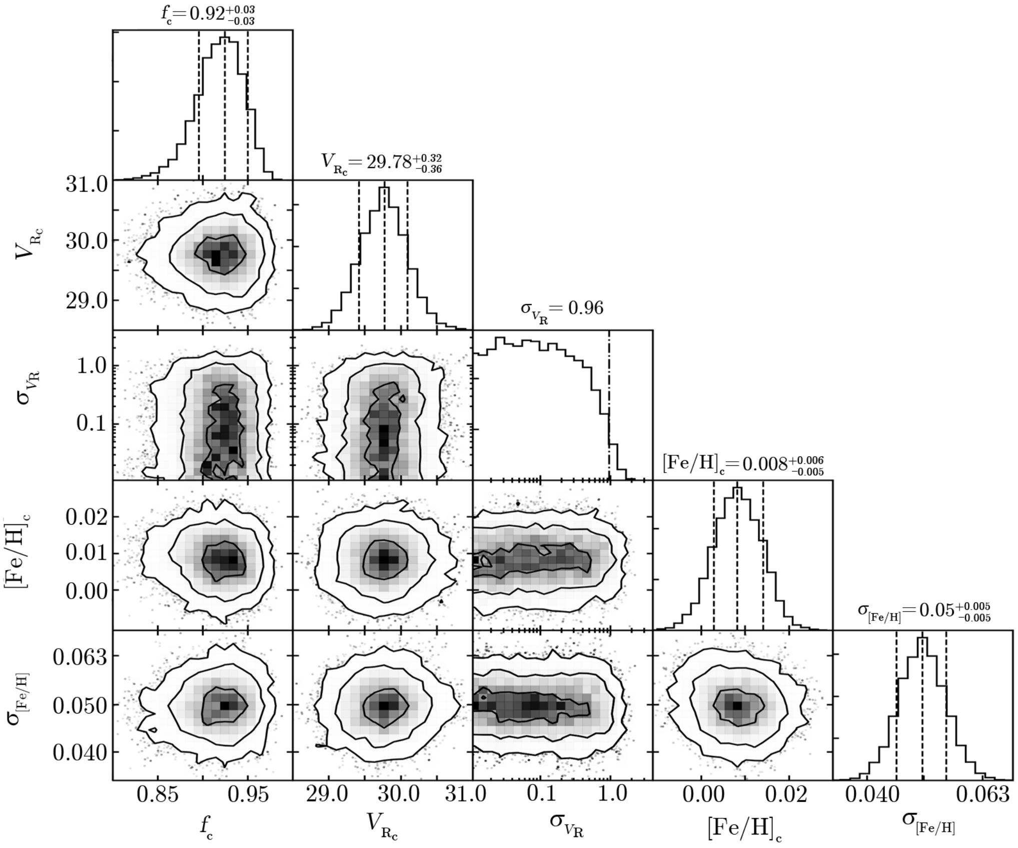
图 4　疏散星团 NGC 2281 最佳拟合参数的概率密度分布

度和金属丰度的平均值都非常一致，只是不考虑观测误差时得到的视向速度的表观弥散由观测误差主导 (如，3 个疏散星团 Melotte 22, NGC 2281 和 NGC 2682 视向速度的表观弥散分别为：$3.51^{+0.21}_{-0.22}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$, $4.57^{+0.36}_{-0.35}$ $\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$ 和 $3.06^{+0.25}_{-0.24}$ $\mathrm{km{\cdot}s^{-1}}$)，远大于各自的内禀弥散。而金属丰度的表观弥散也大于相应的内禀弥散值。这说明基于 LAMOST 低分辨率光谱研究疏散星团运动学和化学性质时，考虑观测误差及其改正因子极其必要。

4.2　比较与讨论

作为外部比较，表 2 中也给出了 Soubiran 等人[42] (以下简称 SC18) 和 PS18 (私人通信) 工作中 3 个团视向速度和金属丰度均值及其内禀弥散的结果。

从表 2 可知，我们得到的 3 个星团视向速度的均值与 SC18 及 PS18 之间存在 3 ～



注：虚线和参数同 3 一致，点虚线表示疏散星团 NGC 2682 视向速度内禀弥散的上限，97.7% (对应于概率分布 2σ 的上限位置) 的概率不超过 0.96 km·s^{-1} 。

图 5　疏散星团 NGC 2682 最佳拟合参数的概率密度分布

表 2　3 个疏散星团视向速度和金属丰度的均值及内禀弥散

星团	f_c	V_{R_c} /(km·s^{-1})	σ_{V_R} /(km·s^{-1})	$[Fe/H]_c$ /dex	$\sigma_{[Fe/H]}$ /dex	参考文献
Melotte 22	0.95 ± 0.02	$1.88^{+0.26}_{-0.24}$	$1.47^{+0.95}_{-1.18}$	$-0.039^{+0.012}_{-0.016}$	$0.170^{+0.012}_{-0.009}$	
		$5.92^{+0.09}_{-0.09}$	1.35	—	—	[42]
		$5.63^{+0.10}_{-0.10}$	$1.19^{+0.11}_{-0.10}$	$0.082^{+0.005}_{-0.005}$	$0.057^{+0.004}_{-0.004}$	[14]
NGC 2281	$0.89^{+0.03}_{-0.04}$	$16.45^{+0.42}_{-0.36}$	$2.05^{+1.39}_{-1.88}$	$-0.049^{+0.012}_{-0.013}$	$0.108^{+0.012}_{-0.012}$	
		$19.58^{+0.34}_{-0.34}$	2.19	—	—	[42]
NGC 2682	$0.92^{+0.03}_{-0.03}$	$29.78^{+0.32}_{-0.36}$	0.96^{*}	$0.008^{+0.006}_{-0.005}$	$0.050^{+0.005}_{-0.005}$	
		$33.8^{+0.13}_{-0.13}$	1.06	—	—	[42]
		$33.86^{+0.06}_{-0.06}$	$0.78^{+0.05}_{-0.05}$	$0.024^{+0.005}_{-0.005}$	$0.066^{+0.004}_{-0.004}$	[14]

注：“$*$”表示疏散星团 NGC 2682 的视向速度内禀弥散上限约为 0.96 km·s^{-1}。

4 km·s^{-1} 的偏差，这是由 LAMOST 巡天与 APOGEE 巡天及 Gaia DR2 巡天之间的系统差造成。系统差主要由仪器效应引起[43]，但具体原因尚不清楚[44]。LAMOST 视向速度系统差的存在已被很多人的工作证实，比如 SC18 和 Tsantaki 等人[43]分别得到 LAMOST DR5 与 APOGEE DR16 及 Gaia DR2 共同源视向速度的系统差分别为：4.7 km · s^{-1} 和 5.18 km·s^{-1}。

我们得到的 3 个星团视向速度内禀弥散与 SC18 和 PS18 相比，虽然存在一定差异，但是在误差范围内非常一致。由于 LAMOST 对视向速度的观测精度相对较差，所以我们的弥散结果有更大的误差也是合理的。

对于 3 个星团金属丰度的均值，我们的结果与 PS18 的均接近于太阳丰度，两者差异很小。对于金属丰度的内禀弥散，我们的结果与 PS18 的都显著大于观测误差，说明疏散星团内部存在不可忽视的金属丰度弥散。出现这种现象可能有以下两种原因：(1) 形成疏散星团的巨分子云是由多个不同金属丰度的小分子云组成；(2) 疏散星团内部的大质量恒星快速演化，造成疏散星团内部气体的化学增丰[45]。Fu 等人[46]发现位于银河系几乎相同空间位置处，年龄小于 100 Ma 的多个年轻疏散星团之间有约 0.4 dex 的金属丰度的差异，并认为这是由本地恒星际介质 (ISM) 的非均匀性混合[47]或者短期内星团内部多星族形成造成的。这也间接证实了我们对上述两种原因的假设。另外，对于 Melotte22，我们的弥散值显著大于 PS18 的结果，这有可能是样本星的光谱型 (质量) 不同造成的，有待于后续进一步研究。

在视向速度方面，ZC20 和 Fu 等人[46]得到 3 个星团的表观弥散分布在 $3 \sim 10$ km·s^{-1} 之间，较我们得到的内禀弥散至少大了半个数量级。通常，疏散星团视向速度内禀弥散的典型值为 $1 \sim 2$ km·s^{-1}，因此如果仅仅考虑表观速度弥散，星团的内部运动学很难深入讨论。

5 总 结

为了降低场星污染的影响，获得更加准确的疏散星团运动学与化学丰度特性，基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱，在视向速度和金属丰度两维空间上，构建包含团星和场星的混合模型。对于混合模型中的团星，构建二维正高斯模型；对于场星，以团天区周围恒星的真实概率密度分布来构建场星的分布模型。

在全面考虑观测误差的影响后，基于混合模型，解算 3 个具有丰富光谱数据的典型疏散星团的视向速度和金属丰度均值及其内禀弥散。年轻星团 Melotte 22 和中年星团 NGC 2281 的视向速度内禀弥散得到较好的约束，分别为：$1.47^{+0.95}_{-1.18}$ km·s^{-1} 和 $2.05^{+1.39}_{-1.88}$ km·s^{-1}，但年老星团 NGC 2682 只能给出视向速度内禀弥散的上限约为 0.96 km· s^{-1}。3 个星团 Melotte 22, NGC 2281 和 NGC 2682 的金属丰度内禀弥散分别为：$0.170^{+0.012}_{-0.009}$ dex, (0.108 ± 0.012) dex 和 (0.050 ± 0.005) dex，均明显大于金属丰度的观测误差 (约 0.028 dex)。这说明疏散星团的成员星存在一定的化学丰度弥散，对于进一步研究星团恒星形成过程极其重要。

致谢

感谢 LAMOST 运行团队提供的海量观测数据，感谢两位审稿人提出的宝贵意见及编辑部老师给予的帮助!

参考文献：

[1] Elson R A W, Sigurdsson S, Davies M, et al. MNRAS, 1998, 300: 857
[2] Ann H B, Lee S H. J. Korean Astron. Soc, 2002, 35: 29
[3] Bastian N, Covey K R , Meyer M R. ARA&A, 2010, 48: 339
[4] Friel E D. ARA&A, 1995, 33: 381
[5] Janes K A. ApJS, 1979, 39: 135
[6] Friel E D, Janes K A. A&A, 1993, 267: 75
[7] Friel E D, Janes K A, Tavarez M, et al. AJ, 2002, 124: 2693
[8] Hou J L, Chang R X, Chen L. ChJAA, 2002, 2: 17
[9] Carrera R, Pancino E. A&A, 2011, 535: A30
[10] Reddy A B S, Lambert D L, Giridhar S. MNRAS, 2016, 463: 4366
[11] Donor J, Frinchaboy P M, Cunha K, et al. AJ, 2020, 159: 199
[12] Zhang H P, Chen Y Q, Zhao G. AJ, 2021, 919: 52
[13] Fleck J J, Boily C M, Lançon A, et al. MNRAS, 2006, 369: 1392
[14] Pang X Y, Shen S Y, Shao Z Y. ApJL, 2018, 868: L9
[15] Wang S G, Su D Q, Chu Y Q, et al. ApOpt, 1996, 35: 5155
[16] Su D Q, Cui X Q. ChJAA, 2004, 4: 1
[17] Zhao G, Chen Y Q, Shi J R, et al. ChJAA, 2006, 6: 265
[18] Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 723
[19] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 1197
[20] Luo A L, Zhang H T, Zhao Y H, et al. RAA, 2012, 12: 1243
[21] Cantat-Gaudin T, Anders F. A&A, 2020, 633: A99
[22] Zhong J, Chen L, Wu D, et al. A&A, 2020, 640: A127
[23] Cantat-Gaudin T, Jordi C, Vallenari A, et al. A&A, 2018, 618: A93
[24] Kuhn M A, Feigelson E D. arXiv e-prints, 2017, arXiv: 1711.11101
[25] Zhao J L, He Y P. A&A, 1990, 237: 54
[26] Shao Z Y, Li L. MNRAS, 2019, 489: 3093
[27] Li L, Shao Z Y, Li Z Z, et al. ApJ, 2020, 901: 49
[28] Lada C J, Lada E A. ARA&A, 2003, 41: 57
[29] Ziliotto T, Alves-Brito A. doi:10.5281/zenodo.4562401, 2021
[30] Gao X H, Chen L. RAA, 2010, 10: 761
[31] Gao X H. Ap&SS, 2020, 365: 24
[32] Hastings W K. Bimka, 1970, 57: 97
[33] Goodman J, Weare J. CAMCS, 2010, 5: 65
[34] Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. PASP, 2013, 125: 306
[35] Bailer-Jones C A L, Rybizki J, Fouesneau M, et al. AJ, 2018, 156: 58
[36] Luo A L, Zhao Y H, Zhao G, et al. VizieR Online Data Catalog, 2022, V/156.
[37] Wu Y, Luo A L, Li H N, et al. RAA, 2011, 11: 924
[38] Wu Y, Du B, Luo A L, et al. IAU Symp, 2014, 306: 340
[39] Zhang S H, Hu G Z, Liu R R, et al. RAA, 2023, 23: 015018
[40] Cantat-Gaudin T, Anders F, Castro-Ginard A, et al. A&A, 2020, 640: A1

[41] Bonatto C, Bica E. MNRAS, 2011, 415: 313
[42] Soubiran C, Cantat-Gaudin T, Romero-Gómez M, et al. A&A, 2018, 619: A155
[43] Tsantaki M, Pancino E, Marrese P, et al. A&A, 2022, 659: A95
[44] Xiang M S, Liu X W, Yuan H B, et al. MNRAS, 2015, 448: 822
[45] Krumholz M R, McKee C F, Bland-Hawthorn J. ARA&A, 2019, 57: 227
[46] Fu X T, Bragaglia A, Liu C, et al. A&A, 2022, 668: A4
[47] De Cia A, Jenkins E B, Fox A J, et al. Nature, 2021, 597: 206

Radial Velocities and Metallicities of Open Clusters Based on Mixture Model

ZHANG Shu-hui[1,2], LIU Rong-rong[1,2], LI Lu[1], HU Guo-zhen[1,2], SHAO Zheng-yi[1,3]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Key Lab for Astrophysics, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Open clusters are excellent tracers to study the stellar population and the formation and evolution of the Galactic Disk. Based on the LAMOST DR7 low-resolution spectra, a mixture model including cluster and field stars is constructed in two dimensions of radial velocity and metallicity: a two-dimensional positive Gaussian model is used to describe the distribution of cluster stars whereas the distribution of field stars is modeled by the stars around the cluster sky region. At the same time, the effect of observational errors is considered in the model. Three typical open clusters with rich spectroscopic data are fitted. The young cluster Melotte 22 and the intermediate-age cluster NGC 2281 can better constrain intrinsic dispersion of radial velocity with $1.47^{+0.95}_{-1.18}$ km·s^{-1} and $2.05^{+1.39}_{-1.88}$ km·s^{-1}, respectively, while the old cluster NGC 2682 only give an upper limit of intrinsic dispersion of radial velocity about 0.96 km·s^{-1}. The intrinsic dispersion of the metallicity of Melotte 22, NGC 2281 and NGC 2682 are $0.170^{+0.012}_{-0.009}$ dex, (0.108 ± 0.012) dex and (0.050 ± 0.005) dex, all significantly larger than the observed error of metallicity (0.028 dex). This suggests that there is a certain dispersion of metallicity in the member stars of open clusters, which is extremely important for further discussion of the cluster star formation process.

Key words: open cluster; mixture model; LAMOST; radial velocity; metallicity